บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

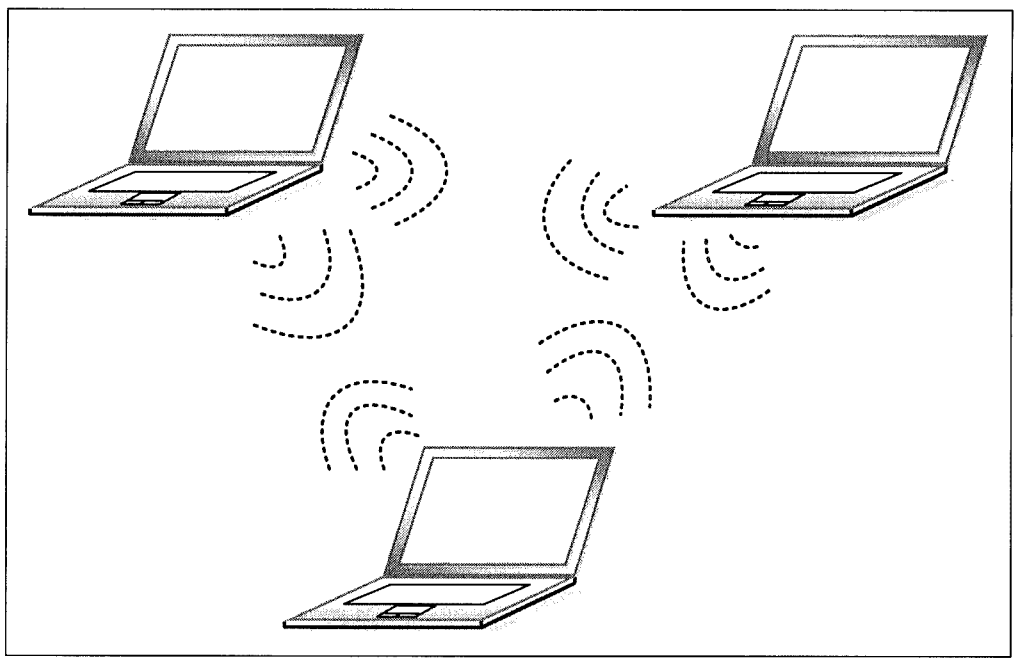
ในการออกแบบสายอากาศสวิตช์แบบลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์สำหรับใช้กับเครือข่ายเมชไร้สายนั้นประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ สายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ซึ่งทั้งหมดนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นบทนี้เป็นกล่าวถึงทฤษฎีของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบเครือข่ายเมชไร้สายซึ่งเป็นระบบที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเชิงเส้นและแบบเชิงระนาบ ซึ่งในส่วนของระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วยระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นและระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่นรวมไปถึงเทคนิคการปรับลำคลื่น วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของงานวิจัยฉบับนี้และสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทนี้

2.2 ทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) เป็นระบบที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง หรือกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่ายไร้สายเข้าด้วยกัน โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในช่วงความถี่ 2.4 - 2.4897 GHz เป็นตัวกลางในการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายแทนการใช้สายเคเบิล ทำให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้งานเนื่องจากไม่ต้องมีการเดินสายส่งสัญญาณ และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายเรื่องสายได้อีกด้วย ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Crow, B.P., Kim, L.G., Sakai, P.T., and Widjaja, I. (1997)

2.2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

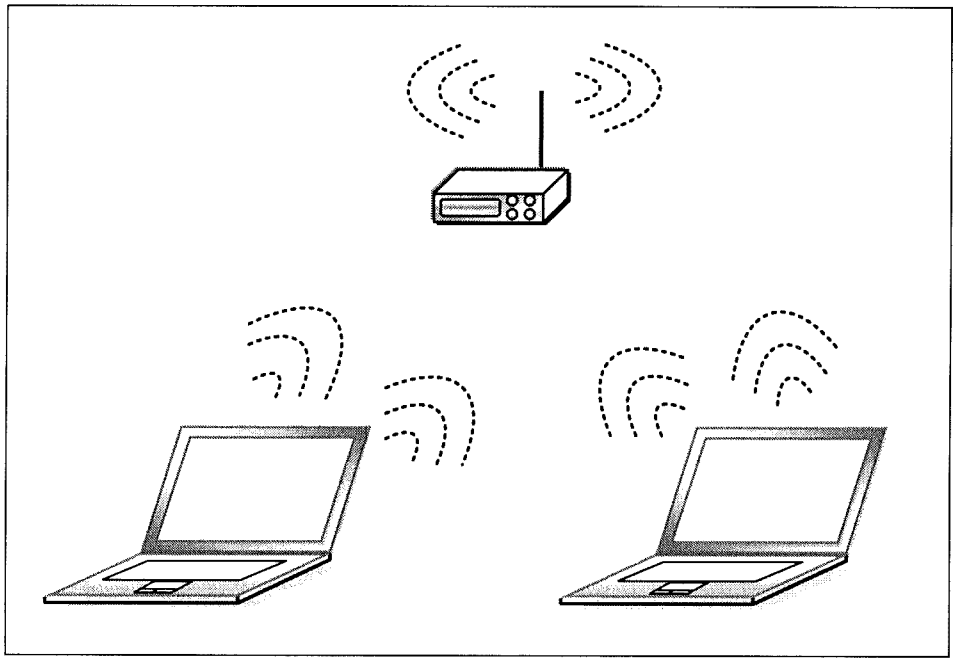
การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว (peer-to-peer หรือ ad hoc mode) เป็นการสื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ไร้สายตั้งแต่ 2 เครื่องเป็นต้นไป ซึ่งทำการเชื่อมต่อกันโดยตรงไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) เครื่องคอมพิวเตอร์จะสื่อสารกันโดยการแชร์ไฟล์ และติดต่อสื่อสารกันได้ภายในวงแลน แต่การเชื่อมต่อแบบนี้เครือข่ายไร้สายจะไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายมีสายได้ นอกจากจะติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณเพื่อให้จุดเข้าถึงสัญญาณทำการเชื่อมต่อและส่งข้อมูลไปยังเครือข่ายมีสายแทน รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว ซึ่งประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ทำการติดต่อสื่อสารกัน โดยไม่ผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ ข้อดีคือ ติดตั้งง่าย สะดวก และประหยัด แต่การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัวก็ยังมีข้อเสียในเรื่องของความปลอดภัยของข้อมูล เนื่องจากไม่มีการป้องกันในรูปแบบของบัญชีผู้ใช้ และรหัสผ่าน



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว

การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง (infrastructure) เป็นการเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยจุดเข้าถึงสัญญาณเป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณของข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์เครือข่ายไร้สายไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เครือข่ายมีสาย ถ้ามีการเข้าใช้เครือข่ายไร้สายโดยมีลูกข่ายจำนวนมากก็จะส่งผลทำให้ความเร็วในการสื่อสารไร้สายช้าลง ซึ่งในปัจจุบันการเชื่อต่อแบบกลุ่มโครงสร้างได้รับความนิยมสูง และมีการพัฒนาเครือข่ายอย่างต่อเนื่องทั้งด้านความเร็วและความปลอดภัย รูป

ที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง โดยการติดต่อสื่อสารของเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ข้อดีคือ มีความปลอดภัยในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีระบบป้องกันในรูปแบบบัญชีผู้ใช้และการเข้ารหัส



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง

2.2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) แบบที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุซึ่งแบ่งเป็น

- Narrow Band Technology: เป็นการรับ-ส่งที่ความถี่ 902 MHz - 928 MHz 2.14 MHz - 2.484 MHz และ 5.725 MHz - 5.850 MHz ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล ระหว่างต้นทางกับปลายทางเพียงหนึ่งคู่เท่านั้น

- Spread Spectrum Technology: เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มาก ซึ่งใช้ความถี่ที่กว้างกว่า narrow band technology โดย spread spectrum คือ ช่วงความถี่ระหว่าง 902 MHz – 928 MHz และ 2.4 GHz - 2.484 GHz โดยการส่งประเภทนี้จะแบ่งได้เป็นแบบ Direct Sequence และFrequency-Hopping

- Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM): เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE802.11a และ IEEE802.11g

2) แบบที่ใช้สัญญาณอินฟราเรดในการติดต่อ รับ-ส่งข้อมูล ลำแสงอินฟราเรด (Infrared: IR) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราไม่สามารถมองเห็นได้เนื่องจากอยู่ในย่านความถี่ของแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงที่เรามองเห็นได้ถูกนำมาใช้เพื่อการสื่อสารระยะใกล้ จุดเด่นคือ คลื่นเดินทางเป็นแนวตรง ราคาถูก และง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้

2.2.3 มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นได้ถูกกำหนดขึ้นโดยองค์กรมาตรฐานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หรือที่เรียกว่า (Institute of Electrical and Electronic Engineer: IEEE)ซึ่งได้กำหนดมาตรฐาน IEEE802.11a 802.11b 802.11g และ 802.11n ขึ้นตามลำดับ ซึ่งแต่ละมาตรฐานมีความเร็วและคลื่นความถี่ของสัญญาณที่แตกต่างกันในการสื่อสารข้อมูลดังนี้

มาตรฐาน IEEE802.11a เป็นมาตรฐานของระบบเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง โดยจะทำงานในย่านความถี่ 5 GHz มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 54 Mbps ที่ความเร็วนี้สามารถรับส่งข้อมูลได้ที่มีความละเอียดสูงได้เป็นอย่างดี อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสามารถปรับระดับให้ช้าลงได้ เนื่องจากคลื่นความถี่ 5 GHz นี้ยังไม่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายดังนั้นจึงทำให้ปัญหาของสัญญาณแทรกสอดนั้นมีน้อย ซึ่งจะไม่เหมือนกับคลื่นความถี่ที่ 2.4 GHz ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงถูกรบกวนจากอุปกรณ์ไร้สายประเภทอื่นที่มีการใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ในมาตรฐาน IEEE802.11a นั้นมีระยะทางในการเชื่อมต่อประมาณ 90 เมตร จากจุดเข้าถึงสัญญาณ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE802.11b แล้ว ระยะทางจะได้น้อยกว่าIEEE802.11b และคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า ซึ่งทั้ง 2 มาตรฐานนี้ไม่สามารถทำงานร่วมกันได้ และในปัจจุบันนี้ประเทศไทยยังไม่อนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่ที่ 5 GHz จึงไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้งานกับมาตรฐาน IEEE802.11a จำหน่ายในประเทศไทย แต่ความเร็วที่ 54 Mbps สามารถใช้งานกับมาตรฐาน IEEE802.11b ซึ่งจะกล่าวถัดไปนี้

มาตรฐาน IEEE802.11b เป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทยโดยจะทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz มีความเร็วในการับส่งข้อมูลที่ 11 Mbps ซึ่งปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้งานภายใต้มาตรฐานนี้ถูกผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก และที่สำคัญอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นจะต้องผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต อุปกรณ์ที่ผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance แล้วจะมีเครื่องหมาย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 ติดที่อุปกรณ์เพื่อบอกถึงความสามารถของอุปกรณ์ไร้สาย เช่น คลื่น

ความถี่ ความเร็วและความปลอดภัยในปัจจุบันนี้นิยมนำอุปกรณ์ไร้สายที่มาตรฐาน 802.11b ได้นำไปใช้ในธุรกิจ สถาบันการศึกษาสถานที่สาธารณะ และกำลังแพร่หลายเข้าสู่ที่พักอาศัยมากขึ้น

รูปที่ 2.3 เครื่องหมาย Wi-Fi

มาตรฐาน IEEE802.11g เป็นมาตรฐานใหม่ที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้งานในย่านความถี่2.4 GHz มีความเร็วในการรับส่งข้อมูล 36 - 54 Mbps ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐานIEEE802.11b โดยมาตรฐาน IEEE802.11g นั้น สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงได้ตามสภาพแวดล้อมของการใช้งานของเครือข่าย ซึ่งมาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมากและกำลังจะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE802.11b ในอนาคตอันใกล้นี้

มาตรฐาน IEEE802.11n เป็นมาตรฐานใหม่ที่ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่าไมโม (Multiple Input Multiple Output: MIMO) โดยเทคโนโลยีนี้จะใช้สายอากาศเก่ง (smart antennas) เพื่อทำการรับส่งข้อมูลเร็วยิ่งขึ้น และยังทำให้ระบบเกิดความเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มระยะทางในการใช้งานระบบได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้มาตรฐาน IEEE802.11n จึงถูกมองว่าจะนำเข้ามาทดแทนมาตรฐาน IEEE802.11g เนื่องจากมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลมากกว่า IEEE802.11g ถึง 5 เท่า โดยมีความเร็วสูงสุดที่ 300 Mbps ซึ่งเร็วกว่าระบบเครือข่ายเดิมและมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลครอบคลุมขึ้นอีก 2-3 เท่า แต่ในปัจจุบันมาตรฐาน IEEE802.11nยังไม่ได้ประกาศออกมาเป็นมาตรฐานที่สามารถใช้งานได้ เพราะยังอยู่ในขั้นตอนของการร่างเท่านั้น

ข้อดีของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1) ความสะดวกในการใช้งาน คือ ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายที่ใดก็ได้ โดยที่ดังกล่าวอาจจะเป็นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งเครือข่ายไร้สาย

2) ความสะดวกในการติดตั้ง เนื่องจากเครือข่ายไร้สายไม่ต้องติดตั้งสายสัญญาณจึงทำให้เวลาในการติดตั้งเร็วขึ้นและไม่ต้องจัดการสายสัญญาณ

3) ความยืดหยุ่น คือ เทคโนโลยีไร้สายทำให้ระบบเครือข่ายไร้สายไปถึงยังที่ที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเครือข่ายไร้สายได้

4) ประหยัดค่าใช้จ่าย ถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเครือข่ายไร้สายจะมีราคาที่สูง แต่ในบางกรณีค่าติดตั้งสายสัญญาณอาจจะมีราคาสูงกว่าก็ได้

ข้อเสียของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1) อัตราข้อผิดพลาดของข้อมูล เนื่องจากเครือข่ายไร้สายใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสารจึงอาจทำให้เกิดการรบกวนจากคลื่นอื่น ๆ เกิดการลดทอนค่อนข้างสูง หรืออาจเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

2) ความปลอดภัยของข้อมูลซึ่งเราไม่สามารถกำหนดทิศทางของข้อมูลและขอบเขตของคลื่นวิทยุได้ ซึ่งข้อมูลที่ส่งอาจเกิดความผิดพลาด

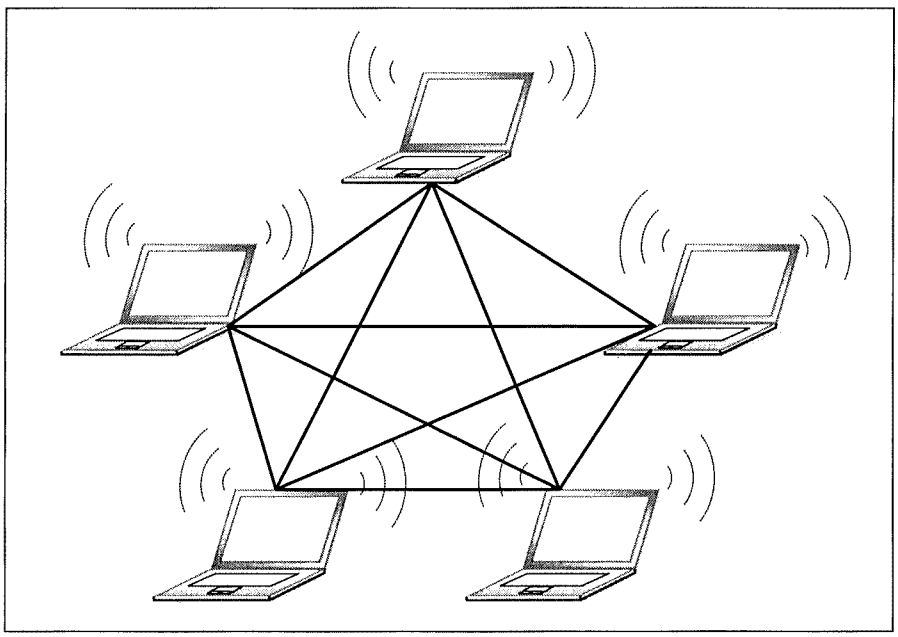
3) การรบกวนในเครือข่ายที่ใช้สายเฉพาะเครื่องที่ต่อกับระบบเท่านั้นจึงจะสามารถส่งข้อมูลระหว่างกันได้ แต่สำหรับเครือข่ายไร้สายแล้วเครื่องที่อยู่ต่างเครือข่ายกันสามารถส่งคลื่นสัญญาณถึงกันได้ ซึ่งบางทีอาจจะเป็นการรบกวนการส่งข้อมูลของเครือข่ายอื่นก็ได้นอกจากนี้ยังมีคลื่นจากแหล่งอื่นที่รบกวนการส่งข้อมูลได้ เช่น โทรศัพท์ไร้สาย เตาไมโครเวฟและวิทยุสื่อสาร เป็นต้น

2.3 ทฤษฎีระบบเครือข่ายเมชไร้สาย

ระบบเครือข่ายเมชไร้สาย (Wireless Mesh Networks: WMNs) คือเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายที่ทำให้จุดเข้าถึงสัญญาณสามารถสื่อสารกันได้ เพื่อส่งผ่านข้อมูลกันได้โดยตรงแบบไร้สายไม่ต้องผ่านสายเคเบิล (cable) ซึ่งใช้คลื่นวิทยุ (radio wave) ในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายแทน โดยมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช (mesh topology) รูปที่ 2.4 แสดงการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายโดยที่อุปกรณ์ไร้สายทุกเครื่องมีการเชื่อมต่อถึงกันหมดซึ่งวิธีการนี้จะสามารถสำรองเส้นทางข้อมูลได้เป็นอย่างดี ระบบเครือข่ายเมชไร้สายประกอบด้วย 2 ส่วน: เครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง (mesh routers) และเครือข่ายเมชของผู้ใช้สัญญาณ (mesh clients)

ในเครือข่ายเมชไร้สายนั้น จะมีการเพิ่มฟังก์ชันในการหาเส้นให้กับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง จึงทำให้การสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์จัดเส้นทางได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการด้วยกำลังส่ง

สัญญาณที่ต่ำ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนี้มักจะถูกสร้างขึ้นมาให้มีรูปแบบคล้ายกัน เช่น อุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) หรือ จุดเข้าถึงสัญญาณ เป็นต้น ในส่วนของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นจะมีการติดต่อกับเครือข่ายเพียงทีละหนึ่งช่องทางเท่านั้น จึงทำให้อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นง่าย และอุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานนั้นก็มีความหลากหลายกว่าอุปกรณ์ของเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง เช่น คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก (Personal Digital Assistant: PDA) RFID reader โทรศัพท์ไร้สาย เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช

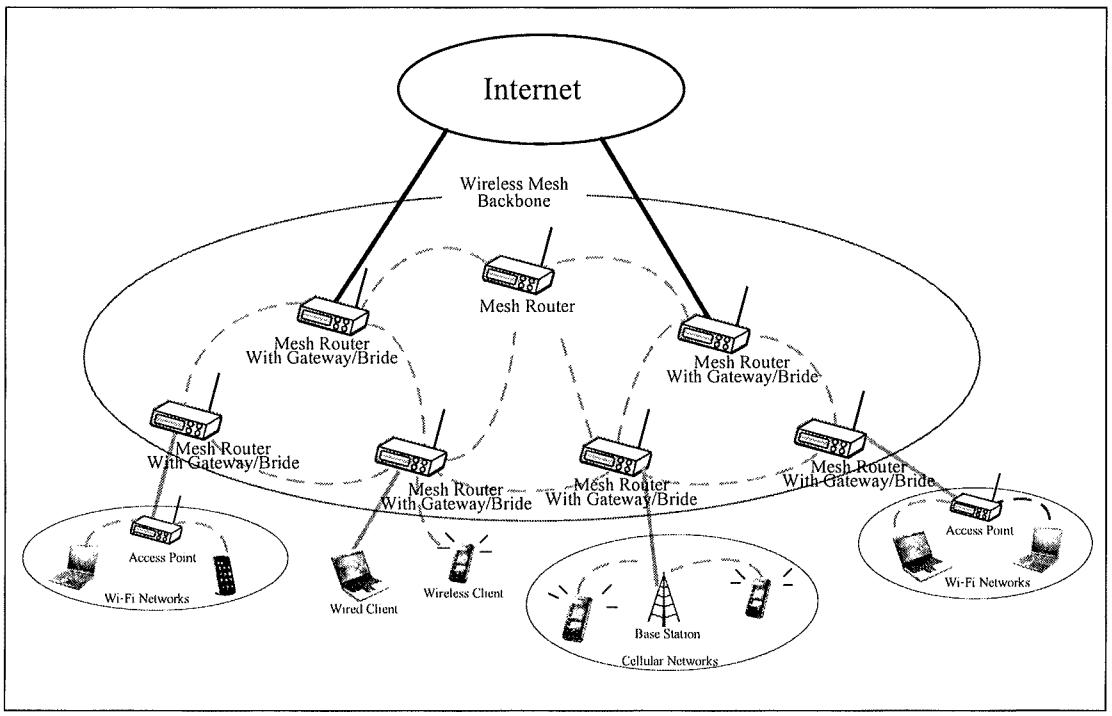
2.3.1 โครงสร้างของเครือข่ายเมชไร้สาย

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยของ Akyildiz, I.F., and Xudong, W. (2005) ได้มีการนำเสนอโครงสร้างของเครือข่ายเมชไร้สาย โดยแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

2.3.1.1 โครงสร้างแบบโครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย

โดยมีรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 เมื่อเส้นทึบและเส้นประแสดงการเชื่อมต่อแบบใช้สายและการเชื่อมต่อแบบไร้สายตามลำดับ โครงสร้างแบบนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อไว้ให้สำหรับลูกข่ายเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายและใช้บริการอินเทอร์เน็ตได้ ส่วนใหญ่จะภายใต้

มาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ในเครือข่ายเมชนี้จะสามารถทำการเชื่อมต่อและรักษาเสถียรภาพของระบบได้ด้วยตัวมันเองและเครือข่ายของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นสามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตด้วยวิธีที่เรียกว่า Infrastructure meshing คือจะมีเครือข่ายหลักให้ลูกข่ายแบบเก่าและเครือข่ายเมชไร้สายสามารถใช้งานรวมกันได้กับเครือข่ายไร้สายที่มีอยู่โดยผ่านฟังก์ชันการทำงานของเกตเวย์หรือบริด (Gateway/Bridge) ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางเอง ซึ่งลูกข่ายแบบเก่านั้นจะสามารถเชื่อมต่อสื่อสารกับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางด้วยระบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) เช่นเมื่อเรามีการติดตั้งเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นไว้บนหลังคาของบ้านในละแวกใกล้เคียงกัน ซึ่งจะใช้เป็นจุดเชื่อมต่อสำหรับผู้ใช้งานภายในบ้านและผู้ที่ใช้งานอยู่ตามถนน ซึ่งการติดต่อสื่อสารกันระหว่างเมชนั้นจะใช้เทคนิคการสื่อสารระยะไกลรวมกับสายอากาศแบบมีทิศทาง

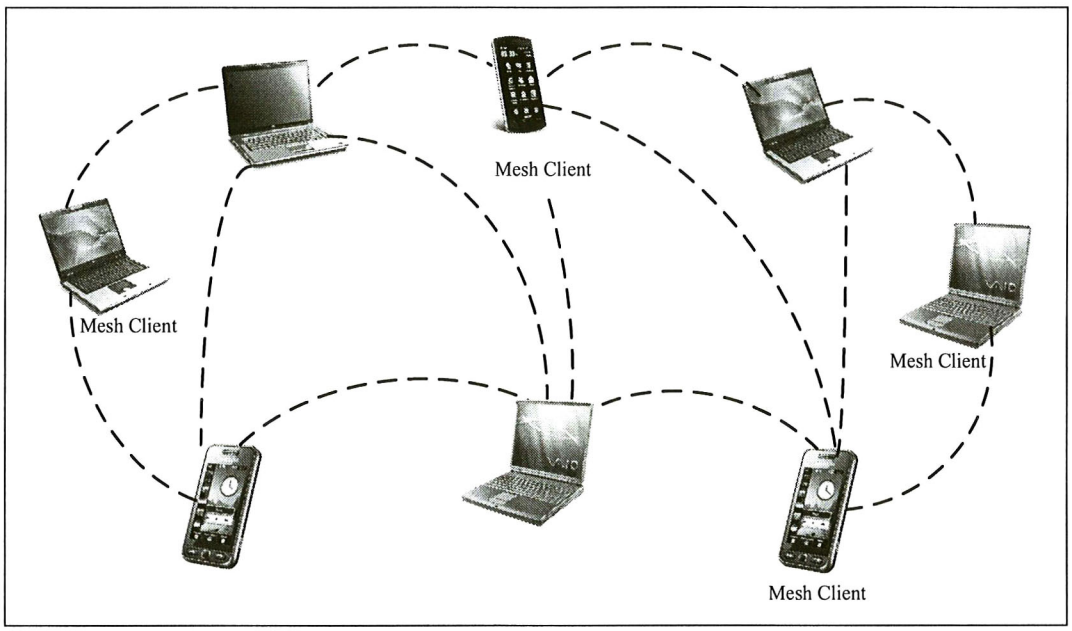


รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย

2.3.1.2 โครงสร้างของเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมชไร้สาย (Client WMNs)

เครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นจะใช้การเชื่อมต่อกันแบบกลุ่มส่วนตัว ในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานในโครงสร้างชนิดนี้โนดของผู้ใช้งานจะทำหน้าที่จัดเส้นทางและจัดการระบบที่ดีที่สุดให้กับกลุ่มผู้ใช้งาน ดังนั้นเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นจึงไม่มีความจำเป็นสำหรับเครือข่ายแบบ

นี้ รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลหรือข่าวสารที่จะส่งไปยังโนดปลายทางนั้นก็จะมีการส่งผ่านจากโนดหนึ่งไปยังอีกโนดหนึ่งซึ่งจะทำการส่งกันไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายทางที่เราต้องการ โดยปรกติแล้วเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นจะใช้เพียงคลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์เท่านั้นนอกจากนี้ ความต้องการของผู้ใช้งานระบบมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมชไร้สาย ดังนั้นในเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นจะต้องมีการเพิ่มฟังก์ชันการจัดเส้นทางและต้องสามารถจัดการระบบได้ด้วยตัวของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานเอง



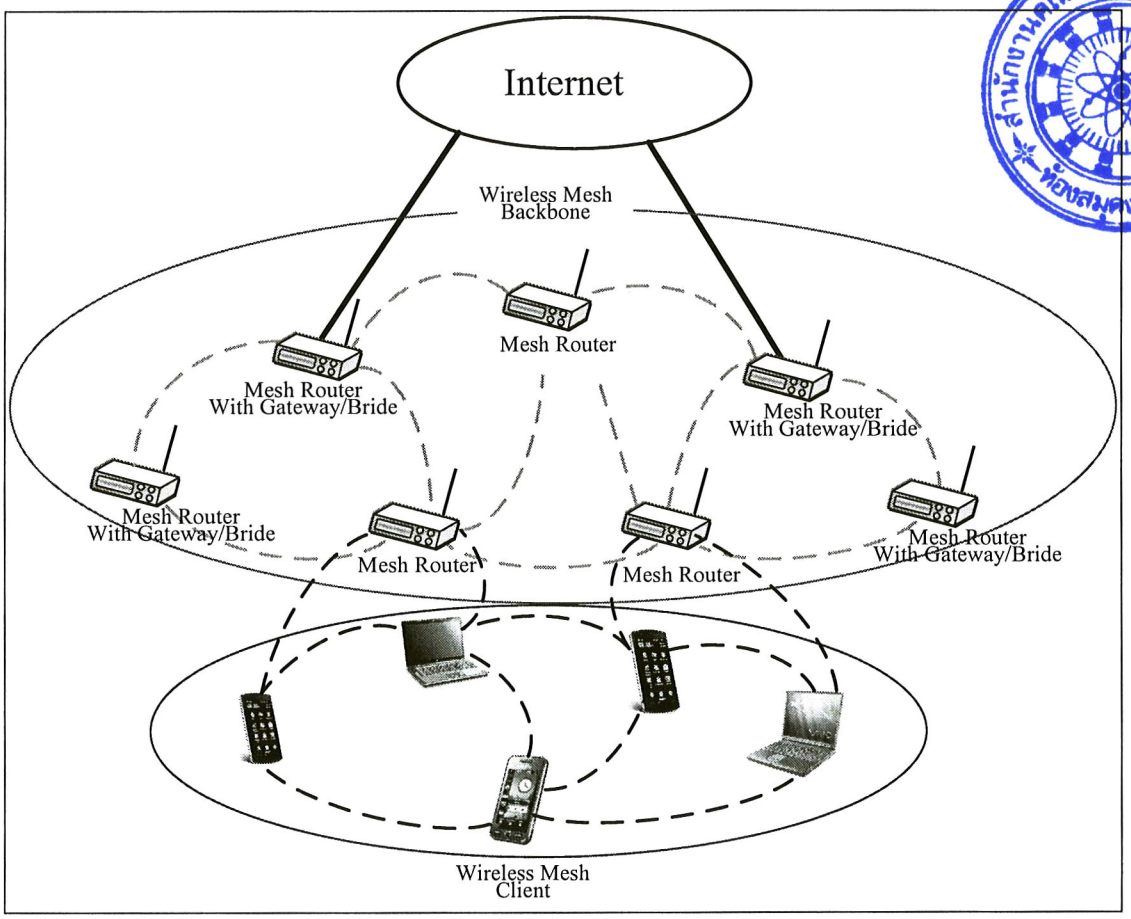
รูปที่ 2.6 ลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งาน

2.3.1.3 โครงสร้างเครือข่ายเมชไร้สายแบบไฮบริด (Hybrid WMNs)

โครงสร้างแบบไฮบริดนี้จะเป็นการรวมกันของโครงสร้างพื้นฐานและโครงสร้างของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยที่เครือข่ายเมชของผู้ใช้งานระบบนั้นสามารถติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายได้โดยผ่านเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางในการเชื่อมต่อกันระหว่างเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานกับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นเราจะใช้สัญญาณวายฟาย วายแมกซ์ สัญญาณโทรศัพท์ และเครือข่ายเซ็นเซอร์ เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์จัดเส้นทางเหล่านี้จะสามารถให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเครือข่ายดีขึ้นและครอบคลุมพื้นที่การให้บริการของเครือข่ายเมชไร้สายได้

2.3.2 โปรโตคอลที่ใช้ควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง *(MAC PROTOCOL)*

จากงานวิจัยของ Stine, J.A. (2006) ได้มีการนำเสนอโปรโตคอลที่สามารถใช้งานกับสายอากาศเก่ง เพื่อนำมาใช้ร่วมกับเครือข่ายเมชไร้สายได้อย่างเหมาะสม ซึ่งโปรโตคอลที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยมีชื่อว่า Synchronous Collision Resolution: SCR ซึ่งโปรโตคอล SCR นี้จะมีการควบคุมการส่งข้อมูลที่จะส่งก่อนหลังตามลำดับ แล้วถึงจะทำการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ต้องการตามลำดับที่ SCR กำหนดไว้ โดยมีหลักการในการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเครือข่ายเมชแบบไฮบริด

มีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นสล็อต (slotted) ในการส่งข้อมูลนั้นทุกโนดจะพยายามส่งข้อมูลเข้าถึงทุก ๆ ช่องสล็อต โดยที่แต่ละโนดจะทำการส่งสัญญาณเพื่อเป็นการจองการเข้าใช้เครือข่ายการส่งข้อมูลทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมการส่งสัญญาณเพื่อจองการเข้าใช้เครือข่ายแล้ว ซึ่งนั้นหมายความว่าระบบจะทำงานโดยการจองช่องสัญญาณเพื่อทำการรอคิวในการติดต่อสื่อสารเครือข่ายหรือทำการส่งข้อมูลนั้นเอง

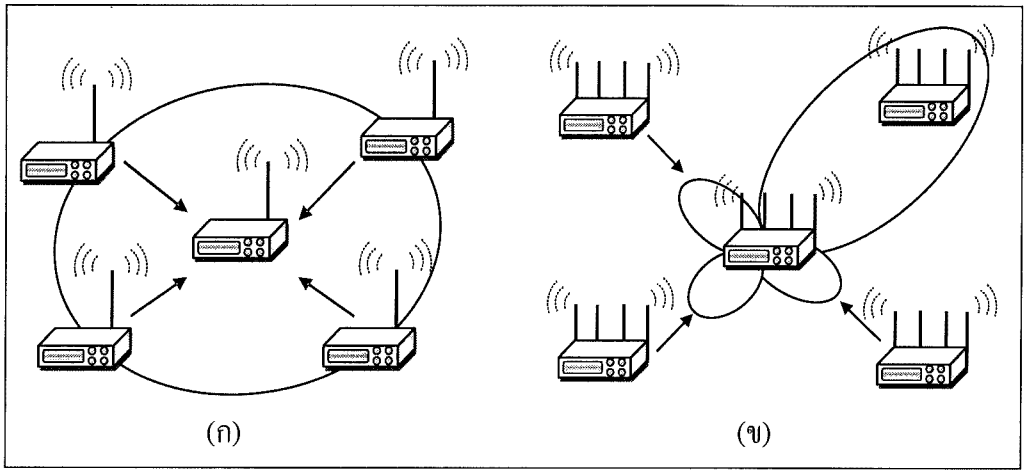
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 21 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 244784

ข้อดีของเครือข่ายเมชไร้สาย

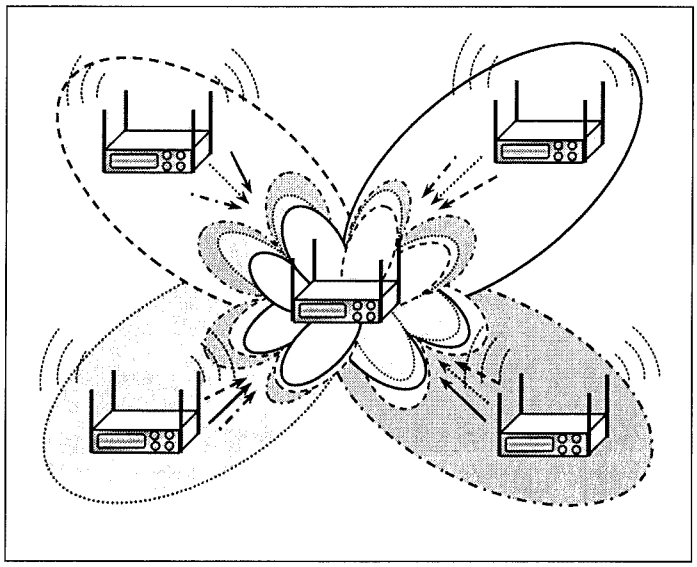
ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบเนื่องจากไม่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ สะดวกต่อการติดตั้งระบบเนื่องจากไม่มีการใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ ทำให้พื้นที่ที่ยากต่อการติดตั้งเครือข่ายไร้สายแบบที่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณสามารถใช้งานเครือข่ายได้ด้วยการติดตั้งเครือข่ายเมชไร้สาย

ข้อเสียของเครือข่ายเมชไร้สาย

เนื่องจากเครือข่ายเมชไร้สายใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ จึงทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกันดังที่แสดงในงานวิจัยของ Daehyung, J., Jeong-keun, L., Sung, J.L., Taekyoung, K., Wonho, K., and Yanghee,C. (2009); Rabbi, M.F., Rahman, M.T., Salehin, G.M.A., and Uddin, M.A. (2006) จากข้อเสียที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเมชไร้สายที่กล่าวมานั้น ทำให้งานวิจัยฉบับนี้ได้มุ่งความสนใจไปที่เครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง เนื่องจากตำแหน่งของเครือข่ายเมชของผู้ใช้สัญญาณนั้นได้ติดตั้งอยู่กับที่ซึ่งเหมาะกับการนำงานในวิจัยฉบับนี้ไปใช้กับเครือข่ายเมชไร้สาย หลักการในการก่อรูปลำคลื่น (beam forming) ของเครือข่ายเมชไร้สายนั้น เริ่มจากการใช้สายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบทิศทาง (omni-directional) แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) ซึ่งจะเห็นว่ามีสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางตัวอื่นมารบกวนกับอุปกรณ์จัดเส้นทางที่เราสนใจ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเข้าใช้ระบบต่ำลง ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยของBabich, F., Comisso, M., and Mania, L. (2007); Chang, S.F., Chu, C.Y., Lin, K.H., and Li, W.R. (2004); Winters, J.H. (2006) ได้นำเสนอการนำเอาสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นและสายอากาศแบบมีทิศทาง มาใช้แก้ปัญหาการเกิดสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกัน รูปที่ 2.8 (ข) แสดงระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นติดตั้งไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายที่สูงที่สุดในทิศทางที่เราต้องการ นอกจากนี้ระบบยังสามารถประหยัดพลังงานได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณแทรกสอดก็ยังคงเกิดขึ้นในระบบและยังมีระดับพูข้างที่สูงอยู่ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศ แต่ผลที่ตามมาก็คือ ระบบจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงทำให้เกิดความสิ้นเปลือง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และยังเป็นระบบที่ใช้สายอากาศจำนวนน้อยทำให้ระบบมีขนาดเล็กและมีต้นทุนต่ำ รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของระบบในงานวิจัยฉบับนี้ โดยระบบนี้สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางที่เราสนใจได้ 4 ทิศทางในเวลาเดียวกัน ซึ่งในแต่ละทิศทางของลำคลื่นหลักนั้นก็จะสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้อีกด้วย



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเครือข่ายเมชไร้สายโดยใช้ระบบของสายอากาศที่แตกต่างกัน
(ก) สายอากาศแบบรอบทิศทาง (ข) สายอากาศแบบชี้ทิศทาง



รูปที่ 2.9 ระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

2.4 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวมีเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆองค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่จำเป็นมากต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และสามารถหันพูข้าง หรือจุดศูนย์ ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น โดยทั่วไปการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

2.4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบพื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่าย ซึ่งมีการจัดวางตัวกันเป็นแบบเส้นตรง สายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศ d ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปรกติแล้วระยะห่างของสายอากาศที่ใช้จะมีการว่างตัวห่างกันเป็นระยะความยาวครึ่งความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น ดังนี้

$$d = \frac{\lambda}{2} \qquad (2.1)$$

รูปที่ 2.10 แสดงถึงสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้น หรือ N× 1 ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้น และมีแอมพิจูดเท่ากัน รูปแบบดังกล่าวถูกเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุก ๆ องค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่า ๆ กัน โดยจะมีองค์ประกอบตัวแรกเป็นจุดอ้างอิงในการหาตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor: AF) ดังสมการที่ (2.2)

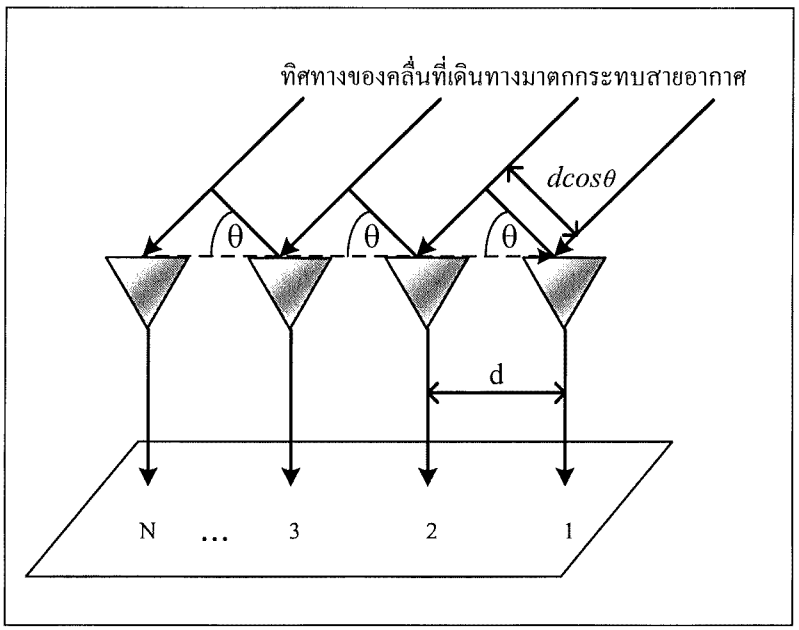
$$AF = 1 + e^{+j(kd\cos\theta+\beta)} + e^{+j2(kd\cos\theta+\beta)} + \cdots + e^{j(N-1)(kd\cos\theta+\beta)} \tag{2.2}$$

$$AF = \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1)(kd\cos\theta)} \tag{2.3}$$

ซึ่งสามารถเขียนอีกรูปหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.4)

$$AF = \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1)\psi} \tag{2.4}$$

เมื่อ $\psi = kd\cos\theta + \beta$ โดยที่ k หมายถึงเลขคลื่น (wave number) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ และ θ คือ ทิศทางของคลื่นที่เดินทางมาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น และ β คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ในกรณีที่เป็นแถวลำดับไม่สม่ำเสมอนั้น ก็ยังสามารถใช้สมการหาตัวประกอบแถวลำดับที่กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน



รูปที่ 2.10 การวางตัวของสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N× 1 ต้น

2.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ คือสายอากาศที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น การจัดเรียงตัวของสายอากาศแบบนี้จะสามารถควบคุมทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern)ได้นอกจากนี้ระบบยังมีระดับพูข้างที่ต่ำอีกด้วย ดังนั้นสายอากาศที่มีการเรียงตัวแบบเชิงระนาบนี้จึงเป็นสายอากาศที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างมาก เช่น การนำไปใช้งานเรดาห์ (radar) การชี้ทิศทางระยะไกล (remote sensing) รวมไปถึงการสื่อสารไร้สายอื่น ๆ เช่น ระบบสายอากาศเก่ง ซึ่งจะถูกอธิบายในส่วนถัดไป

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมบนระนาบ x-y โดยที่สายอากาศ M ต้นจะวางอยู่ในทิศทางของแกน x ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศ คือ d_x และสายอากาศ N ต้น จะวางตัวอยู่ในทิศทางของแกน y ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศ คือ d_y ดังนั้นเราจะได้ขนาดของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยม $M\times N$ ต้น และมี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณทั้งระบบ คือ w_{mn} ที่สายอากาศต้น (m,n) ที่จากที่เราได้กล่าวมาข้างต้นว่าสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบนั้น ได้มีพื้นฐานและแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ดังนั้นในสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบเราสามารถมองว่า ที่สายอากาศ M ต้น ในแต่ละต้นจะมีสายอากาศ N ที่มีการเรียงตัวแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย หรือในทางเดียวกันสายอากาศN ต้น ในแต่ละต้นจะมีสายอากาศ M ที่มีการเรียงตัวแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ดังนั้นเราสามารถหาตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศ $M\times N$ ได้ดังสมการที่ (2.5) โดยอ้างอิงจากหนังสือของ Frank, B.G.,-Ph.D. (2005)

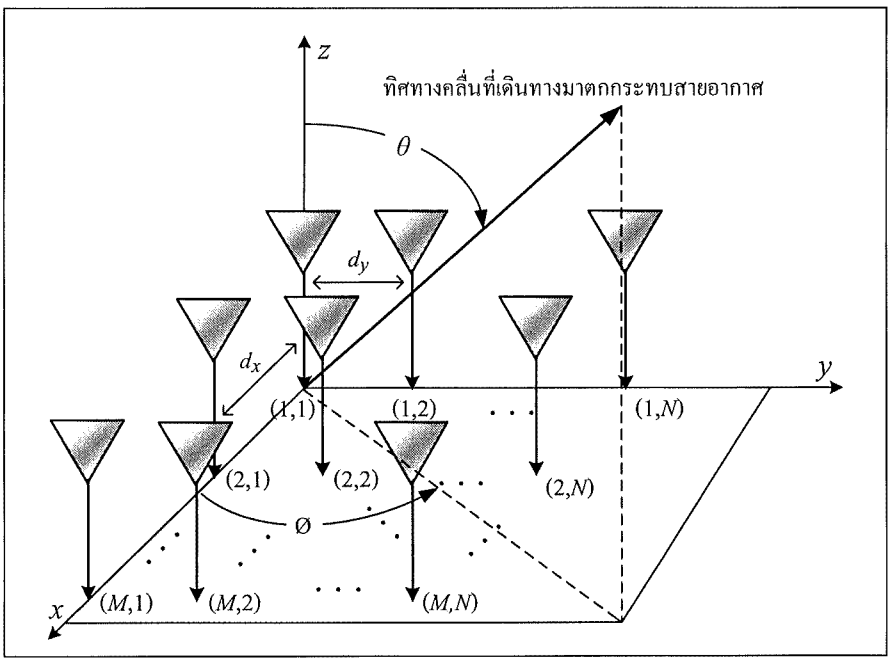
$$\begin{aligned} AF &= AF_x.AF_y \\ &= \sum_{m=1}^{M} a_m e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \sum_{n=1}^{N} b_n e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta\sin\phi+\beta)} \\ &= \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} w_{mn} e^{j\left[(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi+\beta_x)+(n-1)(kd_y \sin\theta\sin\phi+\beta_y)\right]} \end{aligned} \qquad (2.5)$$

เมื่อ $w_{mn} = a_m.b_n$ โดยที่ a_m และ b_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนัก β_x และ β_y คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ แกน y ตามลำดับ ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

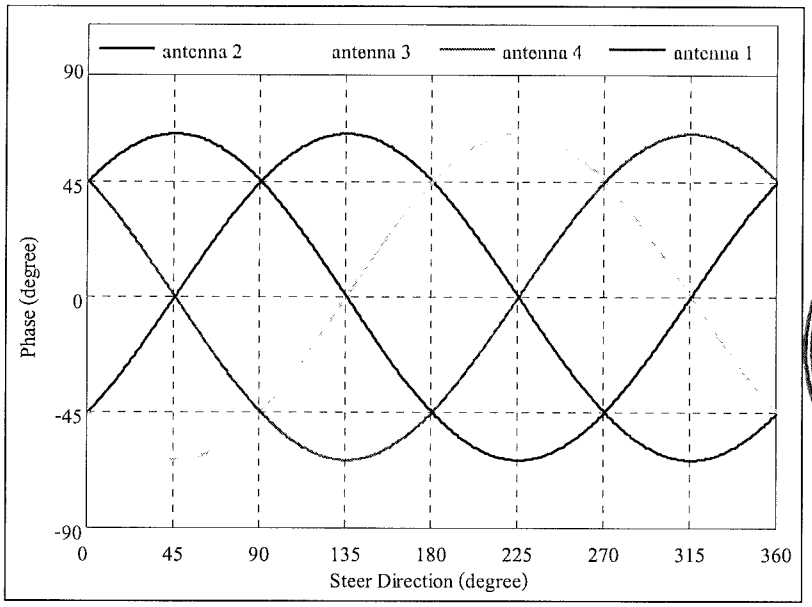
$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 \qquad (2.6)$$

$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \cos\phi_0 \tag{2.7}$$

จากรูปที่ 2.11 เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่มุม θ หรือ มุมในแนวระนาบ (azimuth plane) สายอากาศแต่ละต้นนั้นจะสามารถรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณได้เหมือนกันทุกต้น แต่จะแตกต่างกันที่เวลาของสายอากาศแต่ละต้นเมื่อได้รับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ เราพลอตกราฟของเฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละต้นเมื่อสัญญาณเข้ามาจากทิศทางตั้งแต่ 0° ถึง 360° เมื่อสายอากาศวางเรียงกันเป็นแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับ $\lambda/4$ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 การวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ



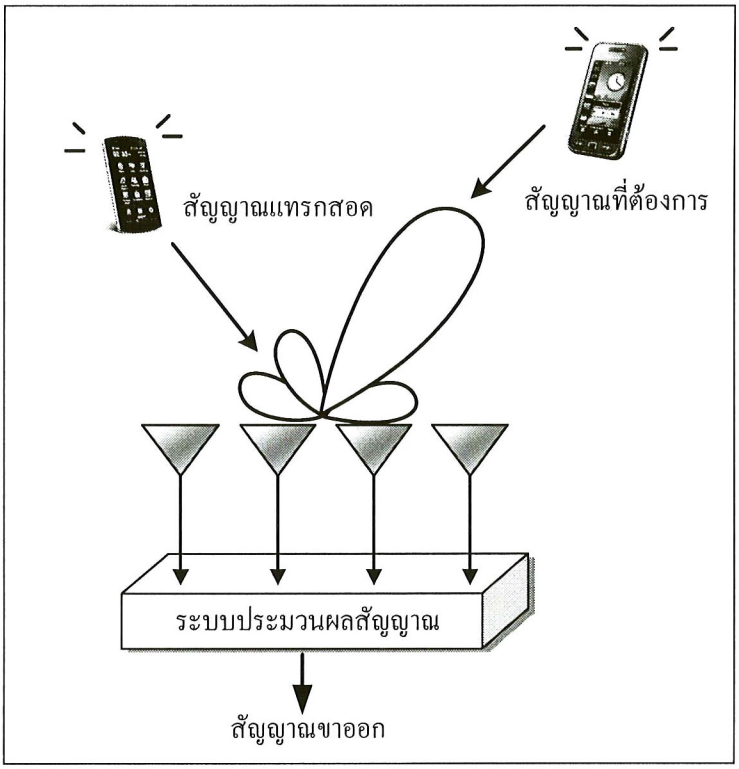
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 2.12 เฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัวสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 เทียบกับทิศทางการมาถึงของสัญญาณ

2.5 ระบบสายอากาศเก่ง

สายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ได้รับความสนใจในช่วงปี 2473 เป็นต้นมาเนื่องจากความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพในระบบสื่อสารไร้สาย สายอากาศเก่งประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลาย ๆ ต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ กันร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและตำแหน่ง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสื่อสารไร้สายดีขึ้น สายอากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการสื่อสารไร้สายเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของช่องสัญญาณซึ่งมีอยู่จำกัด ในขณะที่ผู้ใช้มีมากขึ้น สายอากาศเก่งช่วยปรับปรุงระบบโดยการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและมีความสามารถในการหันลำคลื่นหลักไปในทิศทางที่ต้องการในขณะเดียวกันก็จะสามารถหันจุดศูนย์หรือพูรองไปในทิศทางที่เราไม่ต้องการ หรือทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้เช่นกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่น (beamforming)

รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่งซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ และระบบประมวนผลสัญญาณ ซึ่งระบบประมวนผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival: DOA) และคำนวณค่าการถ่วงน้ำหนักเพื่อก่อรูปลำคลื่นตามที่ได้แสดงในหนังสือของLiberti, J.J.C., and Rappaport, T.S. (1999)



รูปที่ 2.13 ระบบสายอากาศเก่ง

ในส่วนของการหันลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการปรับเฟส หรือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่มายังสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น เพื่อหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดนั้นเรียกว่า การถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปตามมุมเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศต้นนั้น ๆ โดยหลักการเบื้องต้นของการหันลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 จากรูป D คือ ความต่างเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น y คือ สัญญาณขาออกของสายอากาศ θ_d และ θ_i คือ มุมที่มาตกกระทบที่สายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ จากรูปสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y_{out} = y_1 + y_2 \tag{2.8}$$

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นมีค่าดังนี้

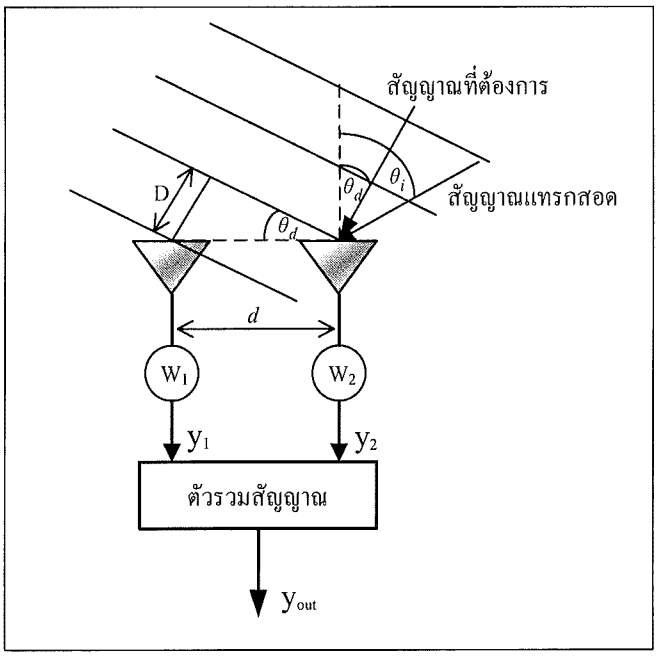
$$y_{2d} = A_d \tag{2.9}$$

$$y_{2i} = A_i \tag{2.10}$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \tag{2.11}$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \tag{2.12}$$

เมื่อ y_{1d} y_{2d} y_{1i} และ y_{2i} คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ตามลำดับ โดยเมื่อผ่าน ตัวถ่วงน้ำหนักแล้วจะได้



รูปที่ 2.14 ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2(A_d + A_i) \tag{2.13}$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \tag{2.14}$$

แทนค่าสมการที่ (2.13) และ (2.14) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$y_{out} = A_i(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \tag{2.15}$$

เราต้องการให้พจน์ของ A_i ในสมการที่ (2.15) มีค่าเป็นศูนย์นั้นคือส่วนของสัญญาณแทรกสอดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดออกไป และทำให้พจน์ของ A_d สมการที่ (2.15) ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณที่ต้องการมีค่าสูงสุด ดังนั้น

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \tag{2.16}$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \tag{2.17}$$

จากสมการที่ (2.16) และ (2.17) จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศทั้งสองต้นดังนี้

$$w_1 = \frac{1}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \tag{2.18}$$

$$w_1 = \frac{-e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \tag{2.19}$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.18) และ (2.19) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \tag{2.20}$$

จากสมการที่ (2.20) สัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ต้องการ แสดงว่าระบบไม่มีสัญญาณแทรกสอดอีกต่อไป ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถให้สัญญาณที่ดีที่สุดที่มาจากทิศทางที่ต้องการได้

ข้อดีของระบบสายอากาศเก่ง

เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงจากการใช้สายอากาศแถวลำดับ ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นจึงทำให้ปัญหาจากสัญญาณแทรกสอดลดน้อยลง มีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีขึ้น ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของผู้ที่ต้องการใช้งานได้และไม่ต้องทำการส่งในทิศทางของผู้ที่ไม่ต้องการใช้งาน จึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่ง

ระบบสายอากาศเก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ ระบบสายอากาศเก่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ (switched-beam antennas) และสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น (adaptive array antennas) ซึ่งจะมีรายละเอียดจากหนังสือของ Ahmed, E.Z. (2005) โดยสังเขปดังนี้

2.5.1 สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

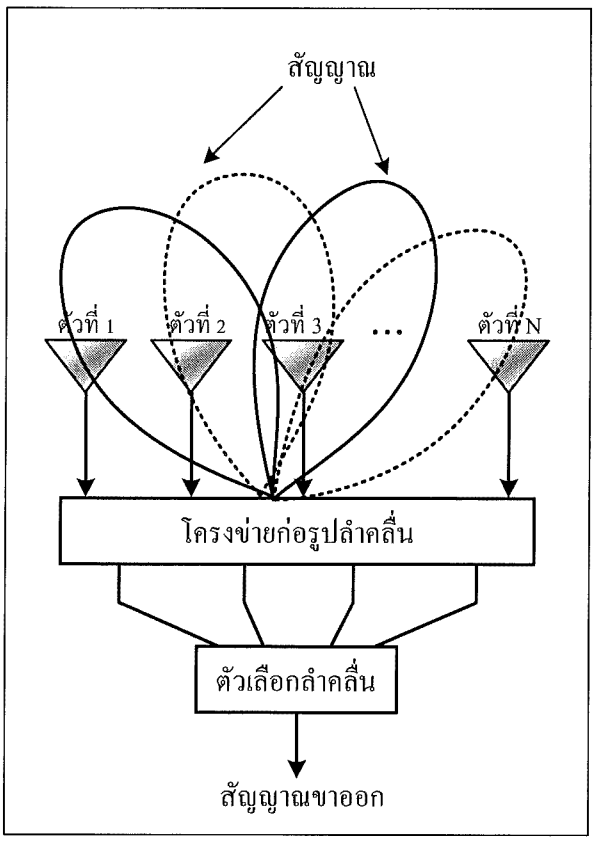
สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้น เป็นสายอากาศที่มีการเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดไปยังสัญญาณที่ต้องการได้ โดยใช้เพียงเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ถูกกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศแถวดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) โดยมีหลักการทำงานดังนี้ สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นในทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด จากนั้นจะใช้ลำคลื่นที่ตัวเลือกลำคลื่นได้ทำการเลือกไว้ เมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่จะทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นใหม่

ข้อดีของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบสายอากาศก่งแบบปรับลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของPeng, M., and Wang, W. (2005); Sarkar, D.K., Seungwon, C., and Shim, D. (1999)

ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น ไม่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ใกล้กับสัญญาณที่ต้องการได้ ในการเลือกสัญญาณมีโอกาสผิดพลาด อาจเกิดจากสัญญาณที่เข้ามาไม่ชัดเจน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อทำการถ่วงน้ำหนักเนื่องจากสัญญาณที่มาตกกระทบยังสายอากาศแต่ละต้นมีมุมเฟสที่ต่างกันออกไป และสร้างลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด โดยอาศัยตัวเลือกลำคลื่นทำหน้าที่เลือกลำคลื่นไปยังสัญญาณที่เราต้องการ จึงทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้จากทิศทางของสัญญาณที่เราไม่ต้องการได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นคือ Butler matrix ซึ่งจะมีการอธิบายในหัวข้อที่ 2.6

2.5.2 สายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น

สายอากาศประเภทนี้มีสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ตลอดเวลา โดยมีหลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีการถ่วงน้ำหนัก โดยอัลกอริทึมแบบปรับตัว(adaptive algorithm) ทำหน้าที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปที่ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 โดยระบบจะทำงานแบบวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

สำหรับอัลกอริทึมแบบปรับตัวมีหลายประเภท อย่างเช่นอัลกอริทึมปรับตัวแบบไบด์ (blind adaptive algorithm) และมอดูลัสคงที่กำลังสองที่น้อยที่สุด (least squares constant modulus) ตามที่แสดงในงานวิจัยของ Agee, B. (1989); Frost, L. (1972)

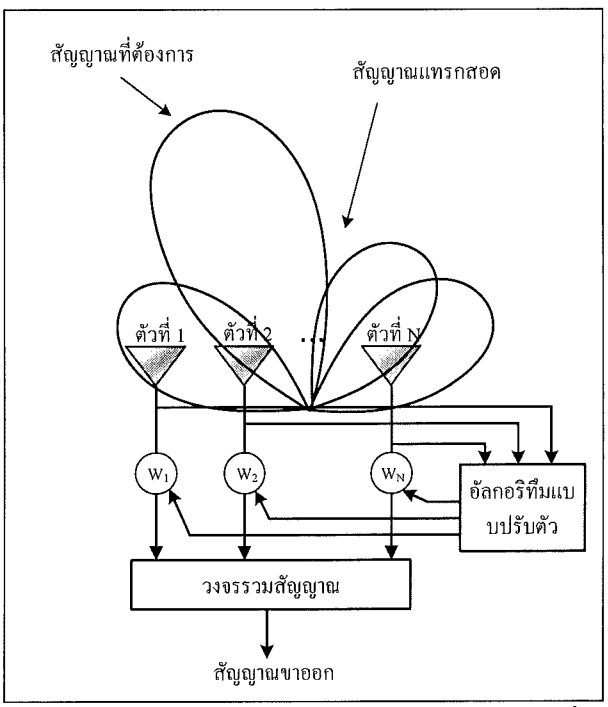
ข้อดีของสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น

มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Noise Ratio: SNR) ที่ดี สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบได้ดีกว่าระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

ข้อเสียระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น

มีความซับซ้อนสูงกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น ต้องการสัญญาณที่แน่นอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการหันลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการ ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้อธิบายถึงหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งทั้งแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัวไปแล้ว พบว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหันลำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว แต่สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นก็ยังมีข้อเสียอยู่ ในเรื่องของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ ลำคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจที่จะกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยจะนำเสนอเทคนิคการหันลำคลื่นของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นในหัวข้อที่ 2.6 และวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในหัวข้อที่ 2.7 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น

2.6 เทคนิคการหันลำคลื่น

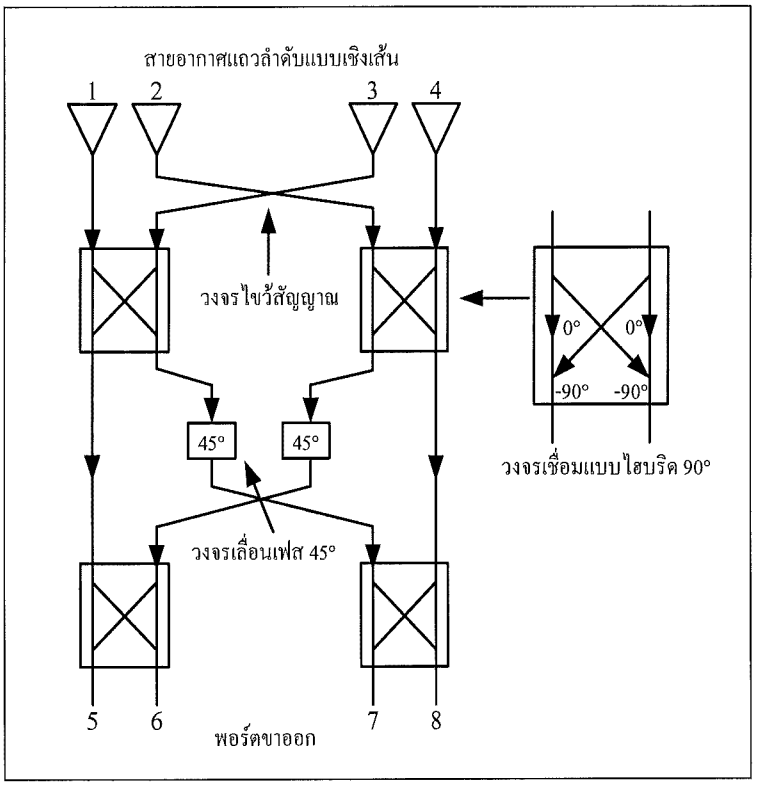
จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงข้อดีของระบบสายอากาศเก่งที่สามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ โดยการหันลำคลื่นของระบบสายอากาศเก่งนั้นทำได้หลายเทคนิค เช่น การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ การลัดวงจรหรือเปิดวงจร แต่วิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในระบบสายอากาศเก่งก็คือ วิธีแบบบัตเลอร์เมตริก ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเทคนิคของบัตเลอร์เมตริก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งอาศัยการกัดลายวงจรบนแผงวงจรพิมพ์เท่านั้น ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้

2.6.1 บัตเลอร์เมตริก

รูปที่ 2.17 แสดงถึงส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริก (Butler matrix) ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศ 4 ต้น วางเรียงกันเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้น วงจรไขว้สัญญาณ (cross over) วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° (90° hybrid coupler) และวงจรเลื่อนเฟส 45° ตามที่แสดงในงานวิจัยของ Moody, H. (1994) โดยหลักการทำงานของบัตเลอร์เมตริก คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศสัญญาณจะถูกส่งไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° และตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นสัญญาณอาจผ่านตัวเลื่อนเฟส45° แล้วจึงถูกส่งผ่านตัวไขว้สัญญาณและตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สร้างลำคลื่นที่มีลำคลื่นหลักหันไปที่ 138.6° 104.5° 75.5° และ 135° แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริก

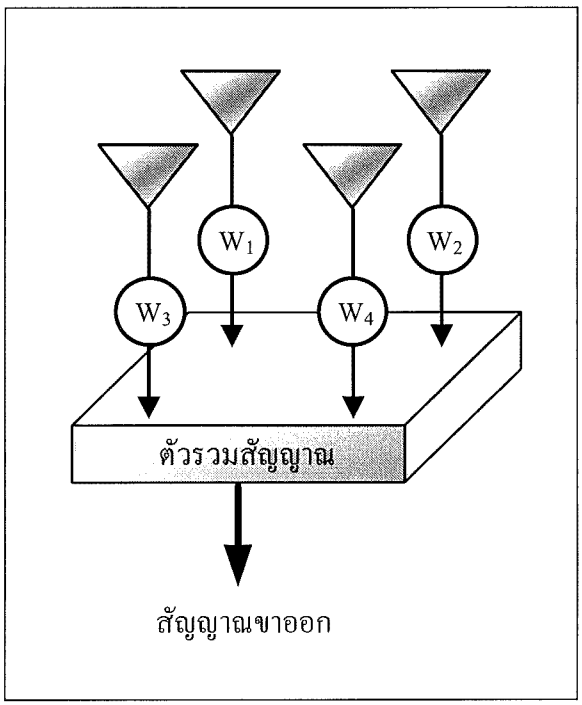
พอร์ตขาออก	สายอากาศ				ทิศทางของลำคลื่นหลัก	ความต่างเฟส
	1	2	3	4		
5	0°	-45°	-90°	-135°	104.5°	-45°
6	-90°	45°	-180°	-45°	41.4°	135°
7	-45°	-180°	45°	-90°	138.6°	-135°
8	-135°	-90°	-45°	0°	75.5°	45°



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริก

2.6.2 บัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

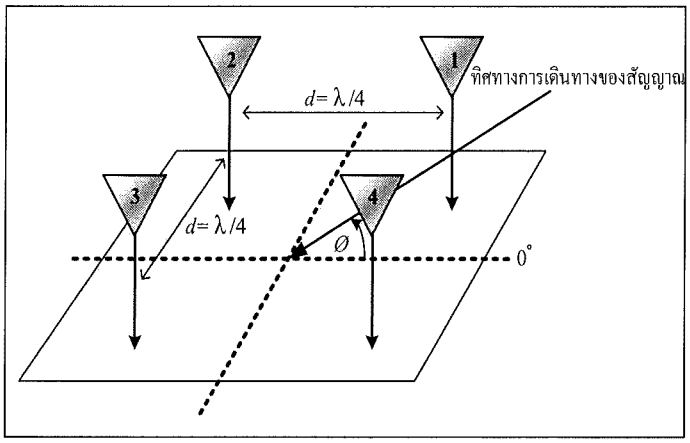
จากที่กล่าวมาข้างต้นบัตเลอร์เมตริกเป็นเทคนิคการหันลำคลื่นที่ใช้กับสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นเท่านั้น แต่งายวิจัยฉบับนี้ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ ดั้งนั้นเราจึงต้องทำการแก้ไขบัตเลอร์เมตริกเพื่อให้ใช้งานได้กับสายอากาศเชิงระนาบ โดยอาศัยการดัดแปลงเพื่อเลียนแบบโครงสร้างของบัตเลอร์เมตริกเดิม ดังที่แสดงในงานวิจัยของ Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2009) รูปที่ 2.18 แสดงระบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 โดยมีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับลำคลื่นติดไว้ที่สายอากาศแต่ละตัว คือ W_1 W_2 W_3 และ W_4 เมื่อมีสัญญาณเข้ามาตกกระทบที่สายอากาศแต่ละต้นในทิศทางใดก็ตาม ตัวถ่วงน้ำหนักจะทำหน้าที่ในการปรับมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละต้นเพื่อให้ได้สัญญาณขาออกที่สูงที่สุดในทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา



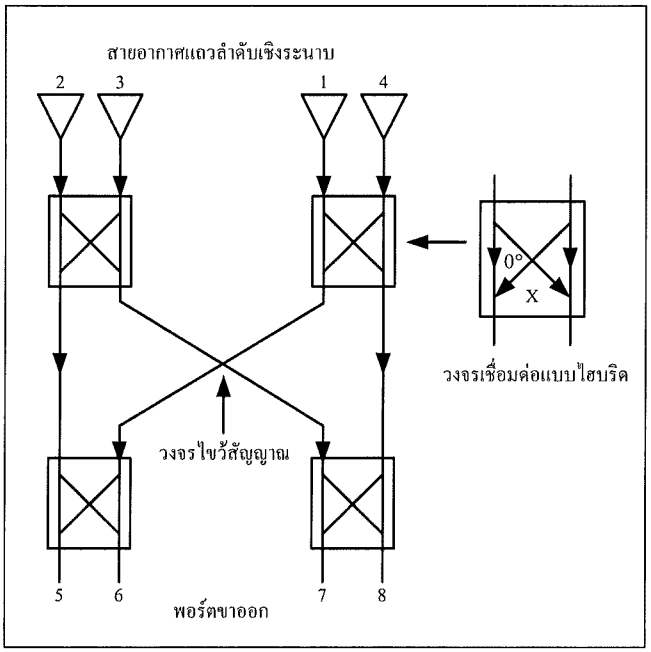
รูปที่ 2.18 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบที่มีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับเฟส
หรือแอมพลิจูดของสัญญาณ

รูปที่ 2.19 แสดงการวางตัวของสายอากาศที่ให้ในระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นอย่างง่าย เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นที่มุม ϕ ใด จะมีมุมเฟสของสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าที่มุม 45° 135° 225° และ 315° เฟสที่มาตกกระทบของสายอากาศแต่ละต้นจะมีความต่างเฟสประมาณ 64° เมื่อเรานำมาเปรียบเทียบกัน และเลียบแบบจากบัตเลอร์เมตริก จะได้โครงสร้างบัตเลอร์เมตริกใหม่ ดังรูปที่ 2.20 แสดงส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริกใหม่ โดยเราจะเรียกว่าบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง ซึ่งจะประกอบไปด้วย วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด (hybrid coupler) และ วงจรไขว้สัญญาณเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถเขียนตารางการเลื่อนเฟสหรือค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่อ้างอิงค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริก ในตารางที่ 2.1 และเราสามารถเขียนค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงได้ เช่นเมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศต้นที่ 1 ผ่านไปยังพอร์ตที่ 5 สัญญาณจะไหลผ่านวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริดเพียงหนึ่งตัวทำให้มีการเลื่อนมุมเฟสเท่ากับ X° ในทางเดียวกัน เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศต้นที่ 2 ผ่านไปยังพอร์ตที่ 5 สัญญาณจะไหลผ่านมาโดยไม่มีการเลื่อนมุมเฟสเลย ดังนั้นจึงมีมุมเฟสเท่ากับ 0° โดยที่ค่าการเลื่อนมุมเฟสทั้งหมดได้แสดงดังตารางที่ 2.2 เมื่อเราแทน

ค่า X = 64° ที่ได้จากการตัดกราฟมุมเฟสของสายอากาศในรูปที่ 2.12 ในขณะที่เราต้องการทิศทางของลำคลื่นหลักไปยัง 45° 135° 225° และ 315° สายอากาศแต่ละตัวจะมีการเลื่อนมุมเฟสไป 64° ดังนั้นจึงแทนค่ามุมเฟสลงในตารางที่ 2.2 จะได้ค่าเลื่อนเฟสของสายอากาศแต่ละต้นแสดงดังตารางที่ 2.3 จากค่าการเลื่อนมุมเฟสพบว่าเราต้องใช้วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด64° (hybrid coupler 64°) เพื่อให้ได้ทิศทางของลำคลื่นหลักไปยัง 45° 135° 225° และ 315° ตามที่เราต้องการ



รูปที่ 2.19 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

ตารางที่ 2.2 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

พอร์ตขาออก	สายอากาศ			
	2	3	1	4
5	0	X	X	2X
6	X	2X	0	X
7	X	0	2X	X
8	2X	X	X	0

หมายเหตุ: X คือ มุมเฟสใด ๆมีหน่วยเป็นองศา

ตารางที่ 2.3 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ ของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

พอร์ตขาออก	สายอากาศ				ทิศทางของลำคลื่นหลัก
	2	3	1	4	
5	0°	64°	64°	128°	135°
6	64°	128°	0°	64°	45°
7	64°	0°	128°	64°	225°
8	128°	64°	64°	0°	315°

2.7 วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Adam, M.A.R.M., and Elkamchouchi, H.M. (2000); Haupt, R.L., Shore, R.A., and Steyskal, H. (1986); Khan, N.M., and Qamar, R.A. (2009); Panique, M., and Yikun, H. (2007) ซึ่งพบว่าระบบการกำหนดทิศทางจุดศูนย์ที่แสดงไว้นั้นเป็นระบบที่มีความซับซ้อน กล่าวคือจำเป็นต้องอาศัยระบบประมวลสัญญาณที่มีสมรรถนะสูงอีกด้วยจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับเครือข่ายเมชไร้สาย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ (null locating method) ด้วยวิธีการที่ง่าย ซึ่งต้องการเพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้คูณกับสัญญาณขาออกจากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเท่านั้น ซึ่งวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์จะทำการหาค่าได้ดังต่อไปนี้ โดยเราสมมุติให้ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาจากมุมในแนวระนาบ ซึ่งสัญญาณที่มาตกกระทบที่สายอากาศ

แต่ละต้นนั้นจะมีทั้งสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณที่ไม่ต้องการและมีเฟสของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน จึงต้องมีการถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ตำแหน่ง (m,n) ของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะประกอบไปด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณที่ไม่ต้องการ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$w_d(m,n) = e^{j\left[(m-1)\left(\frac{\pi}{2}\cos\phi_d\right)+(n-1)\left(\frac{\pi}{2}\sin\phi_d\right)\right]} \tag{2.21}$$

$$w_{i,q}(m,n) = e^{j\left[(m-1)\left(\frac{\pi}{2}\cos\phi_{i,q}\right)+(n-1)\left(\frac{\pi}{2}\sin\phi_{i,q}\right)\right]} \tag{2.22}$$

เมื่อ ϕ_d และ $\phi_{i,q}$ คือ ทิศทางที่เข้ามาของสัญญาณที่ต้องการ และทิศทางที่เข้ามาของสัญญาณที่ไม่ต้องการ ตามลำดับ q^{th} คือ สัญญาณแทรกสอด โดยที่สัญญาณขาออกของสัญญาณที่ต้องการคือ y_d และ สัญญาณขาออกของสัญญาณแทรกสอดคือ y_i ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24)

$$y_d = \boldsymbol{w}_d \boldsymbol{s}_{total} \tag{2.23}$$

$$y_{i,q} = \boldsymbol{w}_{i,q} \boldsymbol{s}_{tatal} \tag{2.24}$$

เมื่อ s_{total} ถูกกำหนดให้เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณที่ประกอบไปด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณที่ไม่ต้องการ จากสมการที่ (2.23) และ (2.24) ผลรวมของสัญญาณขาออกคือ

$$\begin{aligned} y_{total} &= y_d + \sum_{q=1}^{Q} k_q y_{i,q} \\ &= \boldsymbol{s}_d\left(\boldsymbol{w}_d + k_1\boldsymbol{w}_{i,1} + \cdots + k_Q\boldsymbol{w}_{i,Q}\right) + \sum_{q=1}^{Q} \boldsymbol{s}_{i,q}.\left(\boldsymbol{w}_d + k_1\boldsymbol{w}_{i,1} + \cdots + k_Q\boldsymbol{w}_{i,Q}\right) \end{aligned} \tag{2.25}$$

เมื่อ k_q ในที่นี้ถูกกำหนดให้เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ซึ่งจะสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.26) โดยที่จะต้องทำให้สมการในเทอมที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณแทรกสอดในสมการที่ (2.25) หายไปจะได้ดังสมการที่ (2.26)

$$\sum_{q=1}^{Q} \boldsymbol{s}_{i,q}.\left(\boldsymbol{w}_d + k_1\boldsymbol{w}_{i,1} + \cdots + k_Q\boldsymbol{w}_{i,Q}\right) = 0 \tag{2.26}$$

หลังจากที่คำนวณสมการที่ (2.26) แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.27)

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{i,1}s_{i,1} & \cdots & w_{i,Q}s_{i,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_i s_{i,Q} & \cdots & w_{i,Q}s_{i,Q} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -w_d s_{i,1} \\ \vdots \\ -w_d s_{i,Q} \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

จากสมการที่ (2.27) แสดงให้เห็นว่าวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในงานวิจัยฉบับนี้มีความง่าย เพียงการนำค่า k_q ที่ได้คูณกับสัญญาณขาออกก็จะสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ ในทางปฏิบัติเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ k_q เมื่อเรารู้ทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและทิศทางของสัญญาณแทรกสอด จากนั้นเราสามารถใช้วิธีการจากสมการที่ (2.21) - (2.27) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ ในกรณีของเครือข่ายเมชไร้สายนั้น ทิศทางของสัญญาณที่มาจากเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางจะมีทิศทางที่แน่นอน เนื่องจากเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางได้ถูกติดตั้งอยู่กับที่อย่างไรก็ตามทิศทางของสัญญาณในระบบไร้สายอื่น ๆ ก็สามารถใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ได้เช่นกัน

2.8 กล่าวสรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นยังมีข้อเสียในเรื่องของความไม่สะดวกในการใช้งานติดตั้งระบบและยังสิ้นเปลืองอีกด้วย ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีใหม่มาทดแทนเพื่อเพิ่มความสะดวกและประหยัดมากขึ้น คือเทคโนโลยีเครือข่ายเมชไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีนี้ก็ยังเกิดปัญหาในเรื่องของสัญญาณแทรกสอดที่มารบกวนระบบอยู่ เนื่องจากสายอากาศที่ใช้มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นมาใช้ เนื่องจากสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น

เป็นระบบที่ง่าย และต้นทุนต่ำประกอบกับการลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดลงด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ง่ายไม่ซับซ้อน เพื่อนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมชไร้สาย